

# بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر هد آب روی تاج سرریز نیلوفری

مجید احسانی\*<sup>۱</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی اصفهان، magid.ehsani@cv.iut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس و پژوهشکده مهندسی آب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۵

## چکیده

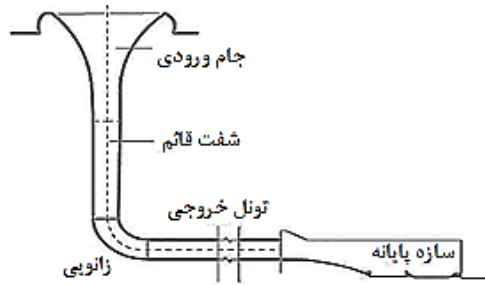
رفتار جریان در سرریزهای نیلوفری با توجه به رقوم سطح آب دریاچه سد، به سه نوع کنترل جریان از تاج سرریز، کنترل جریان از شفت قائم و کنترل جریان در ابتدای تونل تقریباً افقی دسته‌بندی می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده و نتایج با مدل فیزیکی مقایسه شد. نتایج تطابق مطلوبی را بین مدل عددی و فیزیکی نشان می‌دهد. بررسی نمودار دبی-اشل ترسیم شده برای سرریز نیلوفری نشان می‌دهد، که با افزایش دبی ورودی به سرریز نیلوفری، مقطع کنترل از روی تاج به شفت قائم و از آنجا به تونل پایین دست منتقل شده و در حالت استغراق کامل با افزایش کم دبی، هد به میزان قابل توجهی زیاد می‌شود. همچنین نتایج مطالعه پارامتریک روی تغییر طول شفت قائم و تغییر شعاع زانویی نشان می‌دهد این تغییرات بر روی بلندای آب روی تاج سرریز نیلوفری تأثیر مستقیم دارند. بطوریکه با افزایش طول شفت قائم در یک دبی مشخص هد روی تاج زیاد و با افزایش شعاع زانویی، بلندای آب روی تاج در دبی‌های بعد از استغراق زانویی سرریز نیلوفری کم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سرریز نیلوفری، مدل‌سازی عددی، رژیم جریان، شفت قائم، زانویی

## مقدمه

وجود دارد، بسیار مؤثر هستند. مهمترین مزیت سرریزهای نیلوفری کاهش هزینه‌های ساخت آن با استفاده از تونل انحرافی احداث شده در زمان ساخت سد به عنوان تونل افقی می‌باشد. در سدهای خاکی استفاده از این نوع سرریز در مخزن و جدا از بدنه سد موجب کاهش احتمال خطر آبشستگی و اشباع شدن پوسته پایین دست سد می‌شود. سرریزهای نیلوفری همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، شامل سه قسمت اصلی تاج ورودی فنجان‌ی شکل، مجرای قائم یا مایل و مجرای انحراف افقی یا تقریباً افقی می‌باشند.

سرریزهای نیلوفری یکی از انواع رایج سرریزها برای تخلیه آب اضافی پشت سدها هستند. این نوع سرریزها بیشتر در مخازن سدهایی با دبی کم تا متوسط استفاده می‌شوند. سرریزهای نیلوفری با هد آب کمتری نسبت به بقیه سرریزها به نزدیکی ظرفیت حداکثر دبی عبوری می‌رسند. این ویژگی، این سرریز را برای حالتی که حداکثر جریان خروجی از سرریز محدود است بسیار ایده‌آل می‌سازد. سرریزهای نیلوفری در دره‌های تنگ و باریک که تکیه‌گاه‌ها بصورت پلکانی بالا می‌روند و محدودیت مکانی برای ساخت دیگر سرریزها



شکل ۱- شمای کلی سرریز نیلوفری

معادلاتی برای تصحیح ضریب دبی در منحنی دبی - هد ارائه کرد [۵]. انجیلزاده و نوهانی ۲۰۱۶، به بررسی عددی میدان جریان و ارائه منحنی دبی-اشل در سرریز نیلوفری پرداختند [۴].

براساس تحقیقات گذشته، رفتار جریان در سرریزهای نیلوفری با توجه به رقوم سطح آب دریاچه سد، به سه نوع کنترل جریان از تاج سرریز، کنترل جریان در شفت و کنترل جریان در ابتدای تونل در حالت تحت فشار دسته‌بندی می‌شود [۸]. سرریز نیلوفری ممکن است بصورت سطح آزاد<sup>۳</sup> یا بصورت مستغرق<sup>۴</sup> طراحی شود. در رقوم پایین سطح آب دریاچه، رفتار جریان در سرریز نیلوفری تابع دبی عبوری از روی تاج سرریز است. در این حالت شفت قائم بصورت نیمه پر عمل نموده و جریان به دیواره شفت و زانویی برخورد می‌کند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد تا زمانیکه نسبت  $H_0$  (عمق آب روی سرریز) به  $R_s$  (شعاع تاج سرریز) کوچکتر از  $0/45$  باشد کنترل در تاج سرریز است و با افزایش این نسبت، استغراق بیشتر می‌شود، زمانیکه این نسبت به  $1/0$  برسد، سرریز کاملاً مستغرق خواهد بود و از این مرحله به بعد، کنترل جریان در روزنه خروجی خواهد بود [۸].

در حالت سطح آزاد، رفتار سرریز نیلوفری مانند سرریز مستقیم معمولی است و مقدار دبی عبوری از سرریز براساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

یکی از کامل‌ترین تحقیقات انجام گرفته در مورد سرریزهای نیلوفری آزمایش‌های واگنر در سال ۱۹۵۴ است [۹]. در این آزمایش‌ها از یک مدل سرریز لبه تیز دایره‌ای استفاده شد. ضرایب تخلیه<sup>۱</sup> و شکل پروفیل جریان ورودی در وضعیت هوادهی کامل برای سه هد روی سرریز به اندازه  $1/5$ ،  $2$  و  $3$  اینچ اندازه‌گیری شد. گابریس و دگت در سال ۱۹۷۴، جریان ورودی به یک تخلیه کننده قائم را بررسی نمودند [۳]. هدف ایشان بدست آوردن یک مدل کلی برای سیستم‌های هیدرولیکی شبیه به هم بود که در آن‌ها مسئله گرداب همراه با ورود هوا، بر کارایی و میزان تخلیه سیستم تأثیرگذار باشد. آن‌ها توجه خود را به دو عامل لزجت و کشش سطحی معطوف کرده و گزارش کردند که این دو عامل به ترتیب بر شکل چرخش و جاذبه ثقلی در پدیده گرداب تأثیرگذارند. ژاو و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی جریان در سرریزهای نیلوفری تحت رژیم جریان آزاد پرداختند [۱۰]. پینوتی در سال ۲۰۰۸، به بررسی مدل فیزیکی سرریز نیلوفری مخزن ذخیره وال‌نوسی<sup>۲</sup> پرداخت [۷]. هدف از این بررسی ارزیابی رفتار هیدرولیکی سرریز نیلوفری وال‌نوسی و بهبود کارایی و امنیت آن بود. فریرا فیس در سال ۲۰۰۸، در یک تحقیق آزمایشگاهی به تحلیل منحنی کنترل جریان در شفت قائم و ورودی سرریز نیلوفری پرداخت و

1- Discharge coefficient

2-Val Noci

3- Free Flow

4- Submerged Flow

مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. توانایی نرم‌افزار Flow3D در مدل‌سازی نواحی با هندسه پیچیده، استفاده از یک سیستم شبکه‌بندی مستطیلی با قابلیت تغییر بالا و مدل‌سازی سطح آزاد جریان و همچنین قابلیت استفاده از حالت جریان ناپایدار برای حل جریانات پایدار که موجب افزایش سرعت همگرایی می‌شود، موجب شده که در این پژوهش از این نرم‌افزار استفاده شود.

معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفته، به صورت معادلات ناوراستوکس متوسط‌گیری شده، موسوم به (RANS) بیان می‌شوند [۶]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۳)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad (۴)$$

که در آن  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $i$  آشفتگی،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $\rho$  چگالی است.

در نرم‌افزار Flow3D برای مدل‌سازی جریان آشفته، امکان استفاده از شش مدل آشفتگی وجود دارد. مدل‌های آشفتگی مورد نظر شامل مدل طول اختلاط پرانتل (صفر معادله‌ای)، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای-k- $\omega$ ، دو معادله‌ای k- $\epsilon$ ، دو معادله‌ای RNG و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup> است. در بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG که براساس یک روش آماری بدست می‌آید، نسبت به حالت استاندارد، به واسطه داشتن ترم-های اضافی در معادله  $\epsilon$ ، برای تحلیل جریانات سریعاً کرنش یافته<sup>۲</sup> و جریانات بر روی سطوح با انحناهای

$$Q = C_o \times 2 \pi * R_s \times H_o^{1.5} \quad (۱)$$

در حالت مستغرق شرایط جریان کاملاً متفاوت است و تغییرات دبی مطابق رابطه ۲ با مجذور عمق روی سرریز متناسب است:

$$Q = C_o \times \pi R^2 \times \sqrt{2gH_a} \quad (۲)$$

با توجه به توضیحات ارائه شده، از آنجاییکه طراحی سرریز نیلوفری در هر یک از این دو حالت رژیم جریان (سطح آزاد و مستغرق) متفاوت است، تبیین و ارائه نمودار دبی-هد برای سرریزهای نیلوفری کاملاً مفید و الزامی می‌باشد. از طرفی، دانستن این نکته که تغییر در شرایط هندسی سرریز نیلوفری، چگونه بر روند جریان اثر می‌گذارد، می‌تواند برای طراحی سرریز نیلوفری راهگشا و مفید باشد. به همین منظور در مطالعه حاضر نمودار دبی-هد برای سرریز نیلوفری سد البرز در شمال کشور ایران ارائه شده و سپس تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم و شعاع زانویی بر هد آب روی تاج سرریز نیلوفری مورد بررسی قرار گرفتند.

## مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر با توجه به اطلاعات مدل فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز انجام شده است. در این سرریز دبی حداکثر سیلاب محتمل  $1004 \frac{m^3}{s}$  و هد آب روی سرریز به ازای دبی حداکثر سیلاب ۴/۷۴ متر می‌باشد. مدل هیدرولیکی این سرریز در مؤسسه تحقیقات آب ایران با مقیاس (۱ : ۴۲/۹) ساخته و مطالعه شده است [۲]. در این تحقیق برای مدلسازی عددی جریان عبوری از سرریز از نرم‌افزار Flow3D استفاده می‌شود. نرم‌افزار Flow3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار، توانایی مدل‌سازی جریان‌هایی با سطح آزاد با استفاده از روش VOF می‌باشد. Flow3D از یک شبکه متشکل از سلول‌های

1- Reynolds Averaged Navier Stokes

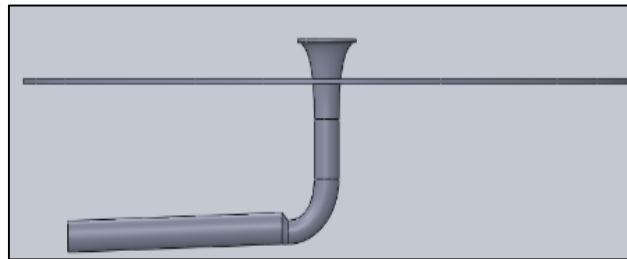
2- Large Eddy Simulation

3- Rapidly strained flows

2013 ساخته شد (شکل ۲). مدل مورد نظر شامل بخشی از مخزن، تاج، شفت قائم، زانویی، تبدیل و بخشی از تونل افقی است. سپس هندسه سرریز نیلوفری سد البرز به صورت یک فایل با فرمت \*.stl برای نرم افزار FLOW3D تعریف شده است.

زیاداً و همچنین در نظر گرفتن اثرات چرخش آبر روی آشفتگی، برای مدل سازی جریان در سرریز نیلوفری بیشتر استفاده می شود [۱]. با توجه به مطالب گفته شده از مدل آشفتگی دو معادله ای RNG در این مطالعه استفاده می شود.

در مقاله حاضر به منظور مدل سازی عددی سرریز نیلوفری در نرم افزار FLOW3D، هندسه مدل به صورت بدنه صلب سه بعدی در نرم افزار Solidworks



شکل ۲- هندسه سه بعدی مدل سرریز نیلوفری در نرم افزار SolidWorks

همچنین در مدل های این تحقیق، از شرایط بدون لغزش در سطح تماس با دیوار استفاده شده است [۶]. در مختصات کارتزین که در شکل ۳ مشخص شده است برای تعریف شرایط مرزی در هر بلوک مکعبی، شش وجه مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها شامل  $X_{min}$ ،  $X_{max}$ ،  $Y_{min}$ ،  $Y_{max}$ ،  $Z_{min}$  و  $Z_{max}$  می باشد. لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در هر بلوک بصورت جداگانه تعریف می شوند. برای انجام محاسبات میدان جریان در هریک از این بلوک ها، بعد از تحلیل حساسیت، مناسب ترین شرایط مرزی مطابق جدول (۱) استفاده شده است.

در مطالعه حاضر جریان بصورت تک فاز و سیال نیز تراکم ناپذیر تعریف شده است. نرم افزار Flow3D برای تشخیص سطح آب از روش حجم سیال<sup>۳</sup> استفاده می کند. در این روش برای سلول های سطح جریان که به صورت نیمه پر هستند، کمیتی تعریف می شود که نسبت پرشدگی آن ها از آب را نشان می دهد که مقدار یک برای آن، نشان دهنده این است که سلول از آب پر شده و مقدار صفر در آن، نشان دهنده این است که سیالی داخل سلول وجود ندارد. با معلوم بودن این کمیت محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول های میدان حل توسط نرم افزار قابل تشخیص است.

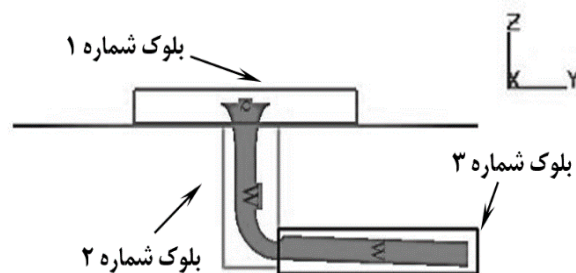
1- High streamline curvature  
2- Swirl  
3- Volume of Fluid (VOF)

جدول ۱ - شرایط مرزی در هر بلوک مش بندی

	بلوک شماره ۱	بلوک شماره ۲	بلوک شماره ۳
$X_{min}$	ورودی دبی <sup>۲</sup>	دیوار <sup>۱</sup>	دیوار
$X_{max}$	ورودی دبی	دیوار	دیوار
$Y_{min}$	ورودی دبی	دیوار	متقارن
$Y_{max}$	ورودی دبی	متقارن	خروجی <sup>۳</sup>
$Z_{min}$	متقارن <sup>۴</sup>	دیوار	دیوار
$Z_{max}$	فشار ثابت <sup>۵</sup>	متقارن	دیوار

شماره ۲ مربوط به شفت قائم و زانوئی و بلوک شماره ۳ نیز مربوط به تونل افقی است.

برای شبکه بندی مدل ساخته شده سرریز نیلوفری همانطور که در شکل ۳ ارائه شده، از ۳ بلوک مش بندی استفاده شد. بلوک شماره ۱ مربوط به تاج سرریز، بلوک



شکل ۳- بلوک های مختلف برای ایجاد مش در سرریز نیلوفری

پارامتر فشار که برای بررسی اندازه بهینه سلول انتخاب شده است از مقدار معینی تجاوز نکند. با هدف بهینه کردن اندازه سلول در بلوک های مختلف، در چهار مدل متفاوت و با اندازه سلول متفاوت که در جدول (۲) آمده اند، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

حساسیت مدل های عددی به شبکه بندی و انفعال میدان حل و همچنین انتخاب مناسب شرایط مرزی از مسائل مهم در مدل های عددی به حساب می آیند. برای تنظیم شبکه بندی میدان حل، در ابتدا از یک شبکه درشت استفاده شده است. سپس شبکه بندی در چندین مرحله ریزتر شده، به گونه ای که حدود تغییرات

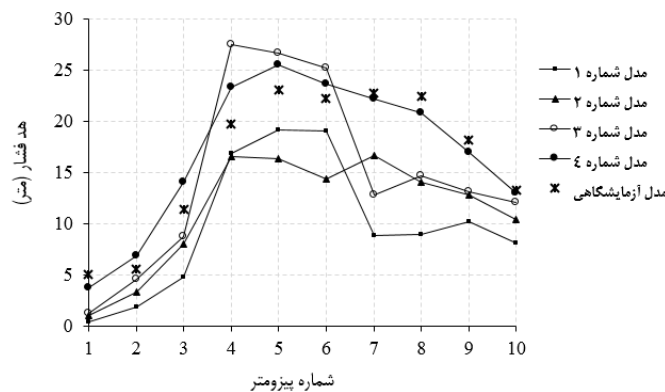
- 1 - Wall
- 2 - Volume Flow Rate
- 3 - Outflow
- 4 - Symmetry
- 5 - Specified Pressure

جدول ۲ - حساسیت سنجی مدل نسبت به اندازه سلول

تعداد سلول	بلوک شماره ۱	بلوک شماره ۲	بلوک شماره ۳
مدل شماره ۱	۲۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
مدل شماره ۲	۳۵۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
مدل شماره ۳	۵۵۰۰۰۰	۳۷۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
مدل شماره ۴	۶۲۵۰۰۰	۴۷۵۰۰۰	۲۰۰۰۰۰

شبکه‌بندی این مدل استفاده شد. در مدل شماره ۴، در مجموع برای سه بلوک نزدیک به ۱۳۰۰۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد. اندازه سلول در بلوک ۱، ۰/۶۶ متر، در بلوک ۲، ۰/۴۲ متر و در بلوک ۳، ۰/۶۷ متر است. همچنین نسبت اندازه سلول در بلوک‌ها واحد در نظر گرفته شده است.

مقایسه نتایج ۴ مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی در بررسی فشار مربوط به کف زانویی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج برداشت فشار در بستر زانویی و برای دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه، نشان داد که نتایج مدل عددی شماره ۴ دارای تطابق مطلوبی با نتایج مدل فیزیکی است. بنابراین، با توجه به تطابق بهتر مدل شماره ۴ در ادامه مدل‌سازی‌ها از مشخصات



شکل ۴- منحنی تغییرات فشار در دبی ۶۰۰ m<sup>3</sup>/s برای اندازه‌های مختلف سلول

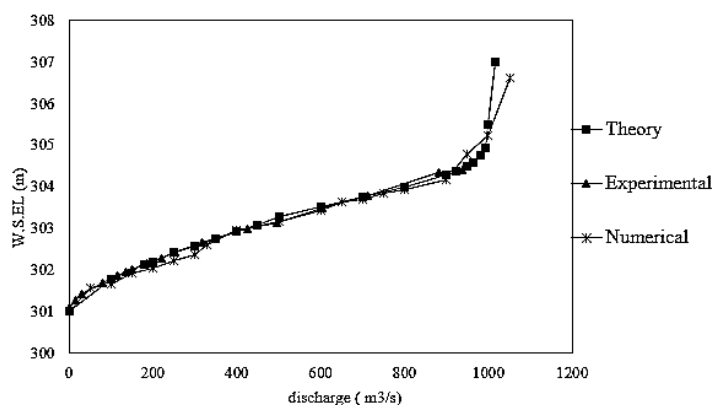
حاصل از روابط تئوریک مقایسه شد. مقایسه مورد نظر در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین منحنی دبی-هد در مدل عددی، مدل فیزیکی و نیز شرایط تئوریک در شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

#### صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، عمق جریان روی تاج سرریز در مدل عددی ساخته شده با نرم‌افزار Flow3D با نتایج مدل فیزیکی و نیز نتایج

جدول ۳- مقایسه نتایج دبی-هد

نتایج عددی		نتایج آزمایشگاهی		نتایج تئوری	
تراز آب (m)	دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)	تراز آب (m)	دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)	تراز آب (m)	دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)
۳۰.۱	۰	۳۰.۱	۲/۴۲	۳۰.۱	۰
۳۰.۱/۵۸	۵۰	۳۰.۱/۷۶	۱۴/۶	۳۰.۱	۱۰۰
۳۰.۱/۶۵	۱۰۰	۳۰.۲/۱۲	۳۱/۲۶	۳۰.۲	۱۸۰
۳۰.۱/۹۲	۱۵۰	۳۰.۲/۲۰	۷۸/۸۷	۳۰.۲	۲۰۰
۳۰.۲/۰۵	۲۰۰	۳۰.۲/۴۲	۱۱۶/۶۸	۳۰.۲	۲۵۰
۳۰.۲/۲۳	۲۵۰	۳۰.۲/۵۸	۱۳۵/۱۱	۳۰.۲	۳۰۰
۳۰.۲/۳۷	۳۰۰	۳۰.۲/۷۵	۱۵۰/۱۹	۳۰.۲	۳۵۰
۳۰.۲/۵۹	۳۳۰	۳۰.۲/۹۲	۱۸۵/۱۸	۳۰.۲	۴۰۰
۳۰.۲/۹۶	۴۰۰	۳۰.۳/۰.۸	۲۲۱/۵۱	۳۰.۳	۴۵۰
۳۰.۳/۱۶	۵۰۰	۳۰.۳/۲۸	۲۵۲/۱۶	۳۰.۳	۵۰۰
۳۰.۳/۴۳	۶۰۰	۳۰.۳/۵۰	۳۱۶/۱۹	۳۰.۳	۶۰۰
۳۰.۳/۶۴	۶۵۰	۳۰.۳/۷۵	۴۲۵/۴۵	۳۰.۳	۷۰۰
۳۰.۳/۷۰	۷۰۰	۳۰.۴	۴۹۶/۴۰	۳۰.۴	۸۰۰
۳۰.۳/۸۵	۷۵۰	۳۰.۴/۲۸	۶۰۳/۶۷	۳۰.۴	۹۰۰
۳۰.۳/۹۲	۸۰۰	۳۰.۴/۳۷	۷۱۳/۰.۴	۳۰.۴	۹۲۲/۲۲
۳۰.۴/۱۵	۹۰۰	۳۰.۴/۵۰	۸۸۰/۴۷	۳۰.۴	۹۴۸/۱۵
۳۰.۴/۷۷	۹۵۰	۳۰.۴/۵۸	۹۳۸/۱۷	۳۰.۴	۹۶۲/۹۲
۳۰.۵/۲۳	۱۰۰۰	۳۰.۴/۷۵	-	۳۰.۴	۹۸۰
۳۰.۶/۶۱	۱۰۵۰	۳۰.۴/۹۲	-	۳۰.۴	۹۹۲/۵۹
-	-	۳۰.۵/۵۰	-	۳۰.۵	۱۰۰۰
-	-	۳۰.۷	-	۳۰.۷	۱۰۱۵



شکل ۵- نمودار دبی - اشل

۸۰۰ m<sup>3</sup>/s کنترل جریان در تاج سرریز، از دبی ۱۰۰۰ m<sup>3</sup>/s تا حوالی ۱۰۰۰ m<sup>3</sup>/s کنترل جریان در شفت قائم و در نهایت در دبی‌های بیشتر از ۱۰۰۰ m<sup>3</sup>/s، سرریز در

با توجه به شکل ۵ منحنی ظرفیت آبگذری سرریز نیلوفری سد البرز با توجه به مقادیر هد روی تاج سرریز، به سه دسته قابل تقسیم‌بندی است: تا دبی m<sup>3</sup>/s

$$MAER = \frac{|C_e - C_a|}{n} \times 100 \quad (5)$$

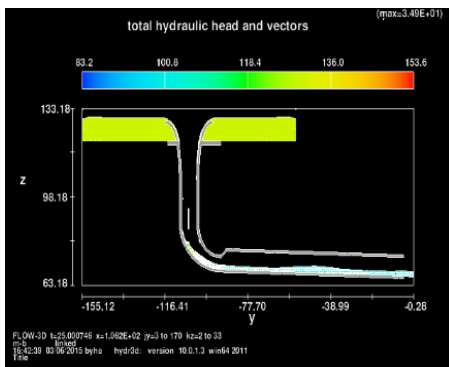
که در آن:  $C_e$  مقدار حاصل از مدل عددی،  $C_a$  مقدار حاصل از مدل فیزیکی،  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشند. مطابق جدول ۴ برآورد میزان خطای هد آب نشان می‌دهد این پارامتر، تطابق مطلوبی با نتایج تئوری و مدل فیزیکی دارد.

حالت غرقاب بوده و خفگی و استغراق کامل رخ می‌دهد و کنترل جریان به تونل افقی انتقال پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر، برای تخمین درصد خطا و خطای متوسط در دبی‌های مختلف از پارامتر MAER که بصورت رابطه (۵) تعریف می‌شود، استفاده شده است. مزیت پارامتر MAER این است که بدون در نظر گرفتن واحدها و کمیت‌های اندازه گیری، نسبت بین داده‌های واقعی و محاسباتی را بیان می‌کند.

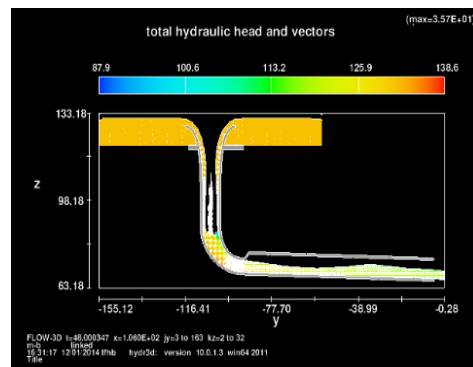
جدول ۴- برآورد میزان خطای هد آب روی تاج سرریز

مقایسه نتایج مدل عددی با:	متوسط خطا (%)	پیشینه خطا (%)
نتایج تئوریک	۵	۱۰
نتایج مدل فیزیکی	۴	۸

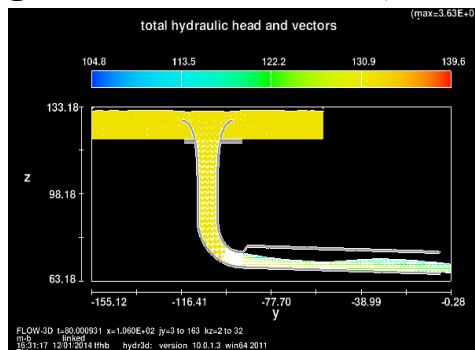
در شکل ۶ هر کدام از حالت‌های جریان و الگوهای جریان تشکیل شده بر روی سرریز نیلوفری، به عنوان نمونه ارائه شده است.



الف) مقطع کنترل: تاج سرریز



ب) مقطع کنترل: شفت قائم



ج) مقطع کنترل: تونل پایین دست

شکل ۶- رفتار و الگوهای جریان تشکیل شده بر روی سرریز نیلوفری



### تحلیل پارامتریک

به منظور بررسی تأثیر برخی پارامترهای هندسی بر هیدرولیک جریان سرریز نیلوفری، از مشخصات مدل فیزیکی سد البرز که صحت‌سنجی براساس آن انجام گرفت، استفاده شد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان سرریز نیلوفری، طول شفت قائم و شعاع زانویی است که می‌توانند بر هد آب روی سرریز اثر بگذارند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

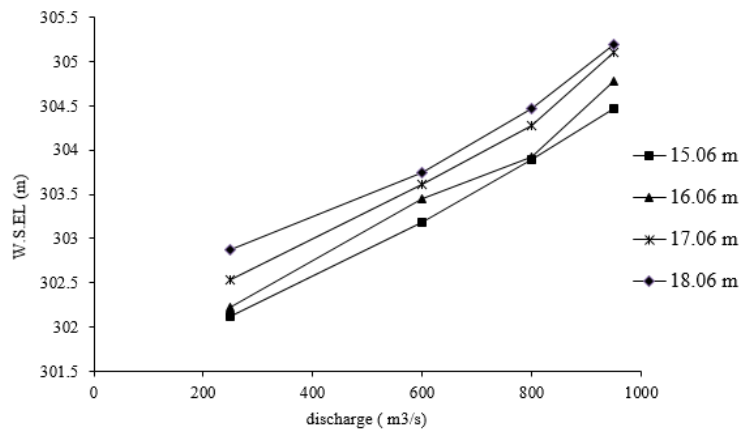
### تأثیر تغییر طول شفت قائم

برای بررسی تأثیر ارتفاع شفت قائم بر الگوی جریان، ارتفاع‌های مختلف شفت قائم در چهار دبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج عددی تأثیر طول شفت قائم بر روی هد روی تاج (m)

ارتفاع شفت قائم (m)				
دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)	۱۵/۰۶	۱۶/۰۶	۱۷/۰۶	۱۸/۰۶
۲۵۰	۳۰۲/۱۲	۳۰۲/۱	۳۰۲/۲۳	۳۰۲/۸۸
۶۰۰	۳۰۳/۱۹	۳۰۳/۴۹	۳۰۳/۴۳	۳۰۳/۷۵
۸۰۰	۳۰۳/۸۹	۳۰۴	۳۰۳/۹۲	۳۰۴/۴۷
۹۵۰	۳۰۴/۴۷	۳۰۴/۵	۳۰۴/۷۷	۳۰۵/۱۹

همچنین شکل ۷ رفتار جریان در ارتفاع‌های مختلف شفت قائم را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر تراز سطح آب مخزن

شرایط لازم است که هد آب موجود در شفت قائم کاهش یافته و در نتیجه هد آب روی تاج سرریز کمتر شود.

با توجه به این مطالب لازم است در هر طراحی ارتفاع مناسب شفت قائم مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه سطح آب مخزن بالاتر از تاج سرریز، غیرمفید است لازم است ارتفاع‌های مختلف شفت قائم به منظور تعیین دبی خروجی بررسی گردد و در نهایت کمترین ارتفاع بهینه با توجه به دبی خروجی تعیین گردد.

### تأثیر شعاع زانویی

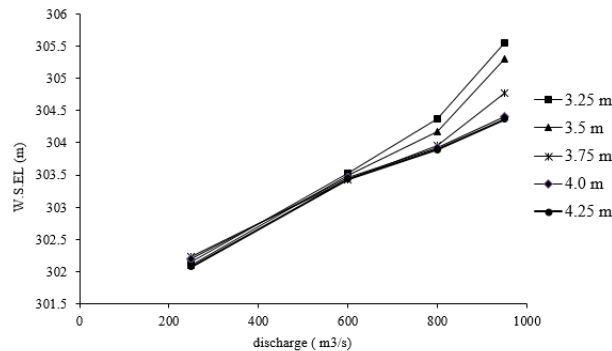
به منظور بررسی تأثیر شعاع زانویی بر روی هد آب روی تاج سرریز، به‌ازای مقادیر مختلف شعاع زانویی در چهار دبی مختلف مدلسازی‌های عددی انجام شد. نتایج موردنظر در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

بر اساس شکل ۷ با تغییر ارتفاع شفت قائم، هد آب روی تاج سرریز دارای تغییرات مشخصی است. بطوریکه که با افزایش ارتفاع شفت قائم، هد آب روی تاج بیشتر شده و با کاهش ارتفاع شفت قائم، هد آب روی تاج کمتر می‌شود. با توجه به اینکه در ارتفاع‌های مختلف شفت قائم، دبی ورودی به مدل عددی یکسان است سرعت نیز بدون تغییر خواهد بود و در نتیجه بدلیل بوجود آمدن شتاب صفر، نیرو نیز برابر صفر خواهد بود. افزایش ارتفاع شفت قائم باعث افزایش اصطکاک دیواره شده و برای ایجاد شتاب صفر لازم است نیروی ایجاد شده توسط جریان برای غلبه بر اصطکاک افزایش یابد. در این شرایط با توجه به اینکه تنها نیروی غالب بر اصطکاک، وزن آب است بنابراین باید هد آب موجود در شفت قائم یا به‌عبارتی هد آب روی سرریز افزایش یابد. این شرایط برای حالتی که ارتفاع شفت قائم کمتر می‌شود نیز صادق است. در این

جدول (۶) - نتایج تغییرات شعاع زانویی بر هد روی تاج (m)

دبی ورودی (m <sup>3</sup> /s)	شعاع زانویی (m)				
	۳/۲۵	۳/۵۰	۳/۷۵	۴/۰	۴/۲۵
۲۵۰	۳۰۲/۱۵	۳۰۲/۱	۳۰۲/۲۳	۳۰۲/۲	۳۰۲/۰۸
۶۰۰	۳۰۳/۵۲	۳۰۳/۴۹	۳۰۳/۴۳	۳۰۳/۴۶	۳۰۳/۴۴
۸۰۰	۳۰۴/۳۸	۳۰۴/۱۸	۳۰۳/۹۵	۳۰۳/۹۲	۳۰۳/۹
۹۵۰	۳۰۵/۵۵	۳۰۵/۳	۳۰۴/۷۷	۳۰۴/۴	۳۰۴/۳۷

همچنین شکل ۸ نتایج رفتار جریان در شعاع‌های مختلف زانویی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمودار تأثیر شعاع زانویی بر روی هد روی تاج

هیدرولیکی مانند دبی ورودی به سرریز و ارتفاع آب روی سرریز برای شفت‌های با طول‌های مختلف و زانویی با شعاع‌های متفاوت، حاصل از مدل‌سازی عددی با کمک نرم افزار Flow3D بررسی شدند. نتایج نشان داد که مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D می‌تواند شرایط هیدرولیکی ایجاد شده در مدل فیزیکی را بخوبی پیش‌بینی نماید. با افزایش عمق آب روی تاج سرریز نیلوفری، مقطع کنترل از روی تاج به شفت قائم و از آنجا به تونل انحراف منتقل می‌شود، و در حالت استغراق کامل، با افزایش مختصر در دبی ورودی، هد آب روی سرریز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. مطالعه تغییرات طول شفت قائم و شعاع زانویی، نشان داد که این دو پارامتر تأثیر مستقیمی بر هد آب روی تاج سرریز نیلوفری دارند. تغییر در طول شفت قائم سبب تأثیر بر روی اصطکاک و در نتیجه هد روی تاج می‌گردد، بطوریکه با افزایش طول شفت، اصطکاک در شفت بیشتر و در نتیجه وزن ستون آب بزرگتر و هد روی سرریز در یک دبی مشخص بیشتر خواهد شد. همچنین با افزایش شعاع زانویی، جریان در محل زانویی راحت‌تر عبور خواهد کرد و زانویی دیرتر به مرحله استغراق می‌رسد. از آنجاییکه هد آب روی سرریز با ارتفاع سد در ارتباط است و ارتفاع سد نیز تأثیر مستقیمی بر اقتصاد پروژه دارد، این تحقیق پیشنهاد می‌کند در طرح‌هایی که نیاز به افزایش هد آب است بجای افزایش ارتفاع سد، اقتصادی‌تر آن است که هندسه سازه سرریز نیلوفری، مانند طول شفت و یا شعاع زانویی افزایش یابد که هم کارایی مورد نظر تأمین شود و هم به اقتصاد طرح کمک گردد.

شکل ۸ نشان می‌دهد تغییرات شعاع زانویی، تأثیر مستقیم بر هد آب روی تاج سرریز نیلوفری دارد. تأثیر شعاع زانویی زمانی کاملاً مشخص می‌شود که زانویی بصورت پر عمل کند زیرا قبل از مستغرق شدن زانویی، نتایج هد آب روی سرریز در شعاع‌های مختلف زانویی، بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند. در شعاع‌های کمتر، زمانیکه دبی افزایش می‌یابد در شرایطی که زانویی بصورت مستغرق عمل می‌کند جریان را پس خواهد زد. با توجه به اینکه در شعاع‌های کوچکتر زودتر شرایط استغراق زانویی فراهم می‌شود، در دبی  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  شعاع‌های کمتر مانند شعاع  $3/25$  متر حساسیت نشان می‌دهند. در دبی  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ، از آنجاییکه در شعاع‌های بزرگتر از  $3/25$  متر جریان راحت‌تر عبور می‌کند، در نتیجه، مقادیر بلندای آب نزدیک بهم می‌باشند. اما در دبی  $950 \text{ m}^3/\text{s}$  که زانویی پر عمل می‌کند، شعاع‌های پایین‌تر بلندای آب زیادی را نتیجه می‌دهد، ولی در شعاع‌های بزرگتر نتیجه هد روی تاج برای شعاع‌های  $4$  و  $4/25$  متر نزدیک بهم می‌باشد که نشان می‌دهد شعاع  $4$  متر پاسخگوی طرح می‌باشد.

از آنجاییکه بلندای آب کاملاً با ارتفاع سد در ارتباط است و ارتفاع سد رابطه مستقیم با اقتصاد پروژه دارد، بسیار مناسب‌تر و اقتصادی‌تر می‌باشد که در صورت امکان و با توجه به همه جوانب، در دبی‌های در این گستره مقدار  $4$  متر برای شعاع زانویی سرریز نیلوفری سد البرز در نظر گرفته می‌شود، تا اینکه ارتفاع سد افزایش نیابد.

### نتیجه‌گیری

از آنجاییکه در سرریزهای نیلوفری با توجه به دبی ورودی، رقوم سطح آب متفاوت است، در نتیجه روش طراحی سرریز نیلوفری متفاوت خواهد بود. به همین دلیل ارائه منحنی دبی - اشل برای تعیین حالت‌های مختلف جریان و تبیین تأثیر عوامل هندسی مانند طول شفت قائم و شعاع زانویی بر هد آب روی تاج سرریز می‌تواند مفید باشد. در تحقیق حاضر پارامترهای مهم

منابع

- ۱- احسانی، م. صالحی نیشابوری، س. ع. ا. ۱۳۹۴. بررسی عددی تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر شکل گیری کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری. نشریه سد و نیروگاه برقابی ایران. ۵ (۲): ۱۳-۲۳.
- ۲- مؤسسه تحقیقات آب ایران. ۱۳۸۰. گزارش مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی البرز.
- 3- Daggett, L. L. Keulegan, G. H. 1974. Similitude Conditions in Free-Surface Vortex Formations. (No.AEWES-Misc-Paper-H-74-1). Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Miss.
- 4- Enjilzadeh, M. R. Nohani, E. 2016. Numerical Modeling of Flow Field in Morning Glory Spillways and Determining Rating Curve at Different Flow Rates. Civil Engineering Journal, 2(9), pp.448-457.
- 5- Fais, L. M. C. F. Genovez. A. I. 2008. Discharge rating curve and scale effects correction in morning gory spillway. In Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. pp. 2041-2046.
- 6- FLOW3D. User Manual. 2008.
- 7- Pinotti, M. Lais, A. 2008. Physical model investigation on the morning glory spillway of the Val Noci water supply facility. International Symposium Zurich. 11.-12. September 2008 in Zürich. Vol. 207, pp. 233-244.
- 8- U.S. Bureau of Reclamation. 1987. Design of Small Dams. 3rded, U.S. Dept. of Interior, U.S. Government Printing Offic., Washington D.C. U.S.A.
- 9- Wagner, W.E. 1956. Morning-Glory Shaft Spillways: A Symposium: Determination of Pressure-Controlled Profiles. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 121(1): p. 345-368.
- 10- Zhao, C. H. Zhu, D. Z. Sun, S. K. and Liu, Z. P. 2006. Experimental study of flow in a vortex drop shaft. Journal of Hydraulic Engineering, 132(1), 61-68.